



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/8710>

#### **To cite this version :**

Sandra ZIMMER-CHEVRET, Laurent LANGLOIS, Julien LAYE, Jean-Claude GOUSSAIN, Patrick MARTIN, Régis BIGOT - Démarche pour le choix et/ou la conception d'un moyen de soudage par FSW - In: 19ème Congrès Français de Mécanique, Marseille, France, 2009-08-24 - CFM'2009 - 2009

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



# Démarche pour le choix et/ou la conception d'un moyen de soudage par FSW

Sandra Zimmer<sup>a</sup>, Laurent Langlois<sup>a</sup>, Julien Laye<sup>b</sup>, Jean-Claude Goussain<sup>b</sup>, Patrick Martin<sup>a</sup>,  
Régis Bigot<sup>a</sup>

*a. Arts et Métiers ParisTech – LCFC, 4 Rue Augustin Fresnel, 57070 METZ, France*

*b. Institut de Soudure – Centre FSW, 2-4 rue Pilâtre de Rozier, 57420 GOIN, France*

## Résumé :

*Les travaux de recherches présentés concernent l'industrialisation du procédé de soudage par friction malaxage, également appelé Friction Stir Welding (FSW). L'objectif est de fournir des outils aux industriels pour choisir et qualifier une machine pour leurs applications de FSW. Cet article présente une méthodologie pour qualifier et / ou concevoir les moyens de soudage adaptés à une application donnée. La démarche de qualification repose sur l'étude géométrique des pièces et sur l'analyse des actions mécaniques transmises par l'outil au travers les domaines de soudabilités. La démarche globale est présentée à l'aide du formalisme IDEF0.*

## Abstract :

*The objective of the presented research work is the industrialization of the friction stir welding process in order to provide tools to industrials to select and qualify a means of production for their FSW applications. This paper presents a methodology to determine the Friction Stir Welding means of production adequate to an application. The methodology is based on the analysis of the workpiece geometries and the analysis of the process forces and torques generated during welding through the determination of the process windows. In this paper, the means of production determination method is presented thanks the IDEF0 formalism.*

**Mots clefs :** Soudage par friction malaxage, moyens de soudage, industrialisation

## 1 Présentation du FSW et problématique

Le soudage par friction malaxage, plus communément appelé Friction Stir Welding (FSW), a été développé et breveté en 1991 par le TWI (The Welding Institute) [1]. L'outil, composé d'un pion et d'un épaulement, est amené au niveau du plan de joint et est mis en rotation. Le frottement de l'outil sur les pièces provoque un échauffement qui entraîne un « ramollissement » de la matière. Cela permet d'insérer le pion à l'interface entre les pièces à assembler jusqu'à amener l'épaulement en contact avec ces dernières. L'outil est ensuite animé d'un mouvement d'avance. Le frottement entre l'épaulement de l'outil et la surface des pièces à souder et la déformation plastique de la matière autour du pion entraînent une élévation de température au niveau de l'outil. L'élévation de la température et la cinématique de l'outil, par la combinaison d'un mouvement d'avance et de rotation, permettent de réaliser la soudure de proche en proche grâce au malaxage de la matière s'opérant autour du pion [2]. La Fig. 1 présente une schématisation du procédé de soudage FSW et le flux de matière autour de l'outil. La caractéristique principale du procédé est d'assembler les métaux sans atteindre leur température de fusion. Ceci lui permet de souder toutes les nuances d'alliages d'aluminium, y compris celles difficilement soudables par les procédés classiques par fusion. Les paramètres opératoires seront choisis afin d'assurer l'apport d'énergie et le malaxage permettant la réalisation de la soudure respectant le cahier des charges technique du produit. L'opération de soudage génère une interaction outil / matière, se traduisant par l'application d'efforts et de couples au niveau de l'outil non négligeables [3]. Ceux-ci sont transmis aux moyens de soudage et impactent ses caractéristiques techniques. Les équipements principalement utilisés aujourd'hui dans l'industrie sont des machines

portiques, produites en petites séries avec des coûts d'investissement élevés, souvent rédhibitoires pour les industriels quant à l'utilisation du FSW [3 & 4].

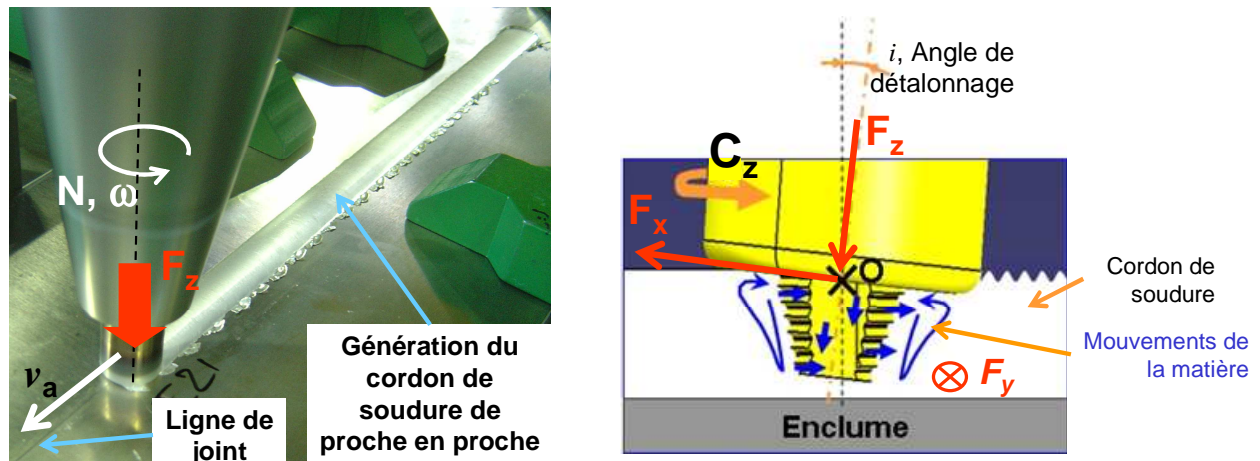


Fig. 1: A- Présentation du FSW. B- Schématisation des efforts et du couple générés lors du FSW

Selon Arbegast [5], d'autres facteurs s'ajoutent à cela, le manque de normalisations industrielles et de spécifications techniques, le manque de directives sur la conception des pièces assemblées et le manque de connaissance sur les efforts à appliquer. A l'heure actuelle, les industriels ne disposent pas d'abaque permettant de déterminer, pour un alliage, une épaisseur et un outil donnés, les paramètres opératoires aboutissant à une soudure sans défaut. Ce type de diagramme correspond au domaine de soudabilité opératoire. A ce diagramme doit être ajouté les torseurs des actions mécaniques générés par l'opération de soudage, afin de qualifier les moyens de soudage. C'est pourquoi, il est nécessaire de formaliser une démarche pour qualifier un moyen de production FSW. La Fig. 2 illustre, à travers le formalisme IDEF0, les entrées et les sorties occasionnées pour qualifier un moyen de production FSW.

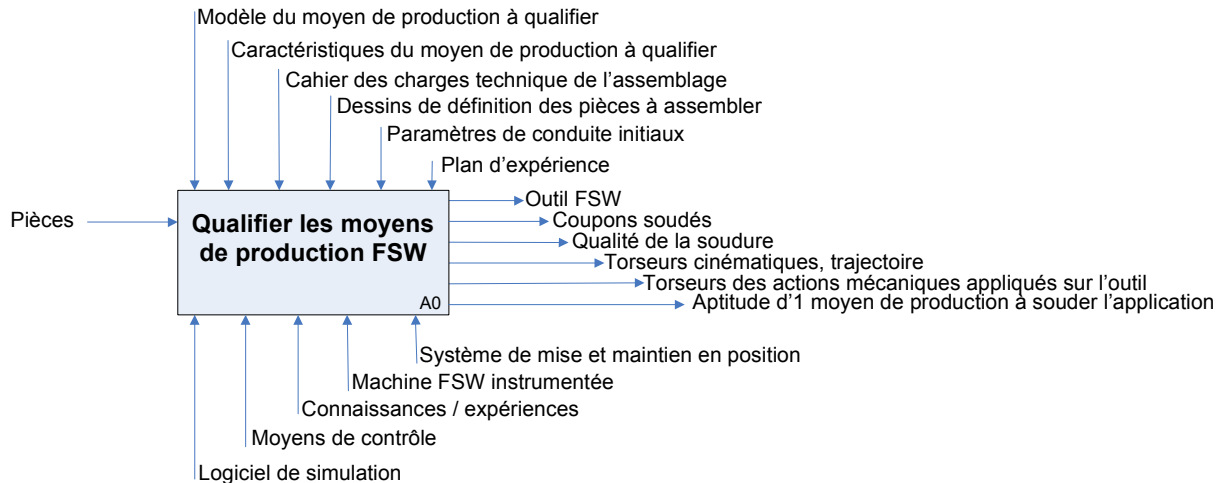


Fig. 2: Graphe IDEF0 : Nœud A0 : Qualifier un moyen de production FSW

La suite de cet article présentera la démarche mise en place pour qualifier ou déterminer les spécifications techniques pour la conception d'un moyen de soudage FSW.

## 2 Démarche de qualification d'un moyen de production FSW

Le travail de recherche commun entre le LCFC et l'IS concerne la formalisation d'une démarche permettant de mettre en place un cahier des charges pour la conception d'une machine de FSW ou l'adaptation d'une structure existante dans l'industrie. Cette démarche repose sur l'étude physique du procédé, l'identification des paramètres de conduite du procédé et l'influence de ces paramètres sur les efforts outils / pièces. La Fig. 3 présente la démarche mise en place pour qualifier et valider le choix d'un moyen de production FSW.

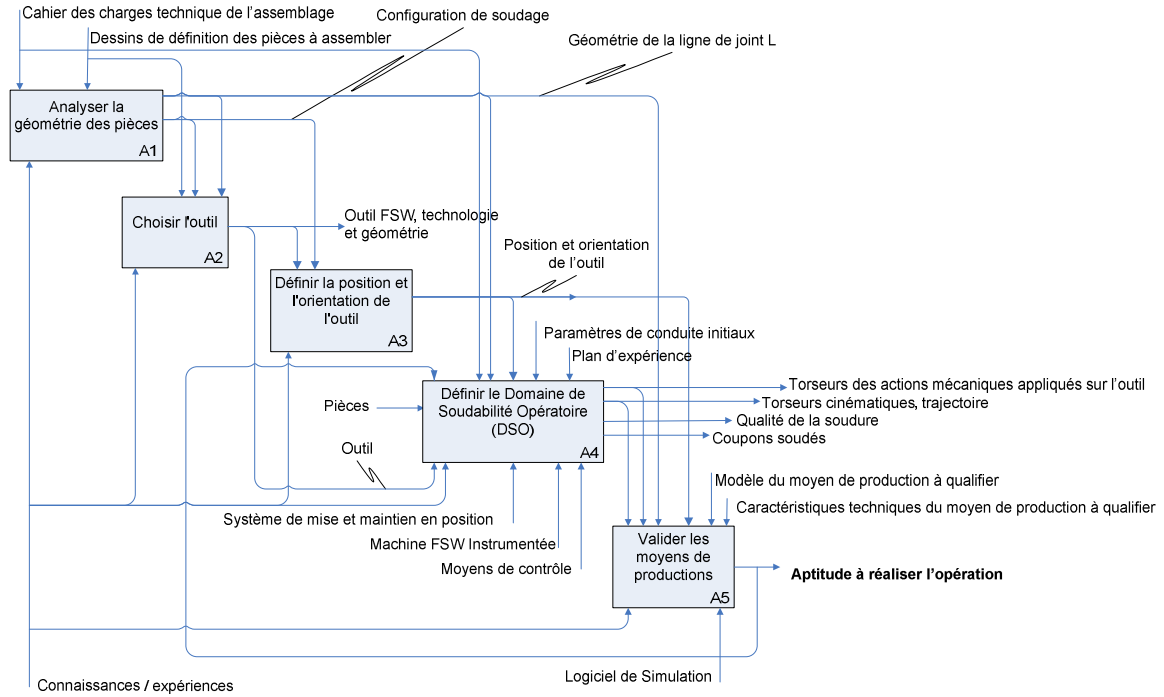


Fig. 3: Graphe IDEF0 : Nœud A0 : Qualifier un moyen de production FSW

La démarche s'appuie principalement sur l'analyse de la géométrie des pièces soudées et sur l'étude du domaine de soudabilité associée aux efforts et couples appliqués sur l'outil. A partir des résultats obtenus par ces études, il est possible de qualifier et de valider le choix d'un moyen de production.

## 2.1 Analyse de la géométrie des pièces

Pour cette analyse, Zimmer et al. [6] ont proposé une étude basée sur l'étude de l'interaction Outil / Matière (aspect local) et Outil / Pièce (aspect global). Le principe est d'analyser la géométrie de la ligne de joint  $\mathcal{L}$  en définissant, pour chaque point  $M_i$  appartenant à  $\mathcal{L}$  un repère orthonormé direct  $R_{M_i}$  ( $M_i, \vec{t}_i, \vec{v}_i, \vec{n}_i$ ), tel que le vecteur  $\vec{t}_i$  soit tangent à  $\mathcal{L}$ , le vecteur  $\vec{n}_i$  soit perpendiculaire à  $\vec{t}_i$  et aux plans tangents aux surfaces des pièces en  $M_i$ . La position et l'orientation du repère associé à l'outil  $R_O$  ( $O, x, y, z$ ) peut alors être défini, en chaque point  $M_i$ , par rapport au repère  $R_{M_i}$ . Ainsi, il est possible de déterminer la position et l'orientation de l'outil, par rapport à un repère fixe lié à la pièce  $R_P$ , en posant les matrices de passage en coordonnées généralisées liant  $R_O$  à  $R_{M_i}$  et  $R_{M_i}$  à  $R_P$  pour chaque point  $M_i$  appartenant à  $\mathcal{L}$ . L'espace de travail, la trajectoire de l'outil et l'accessibilité au plan de joint requis, pour l'opération de soudage sont alors définis. La Fig. 4 illustre cette méthodologie.

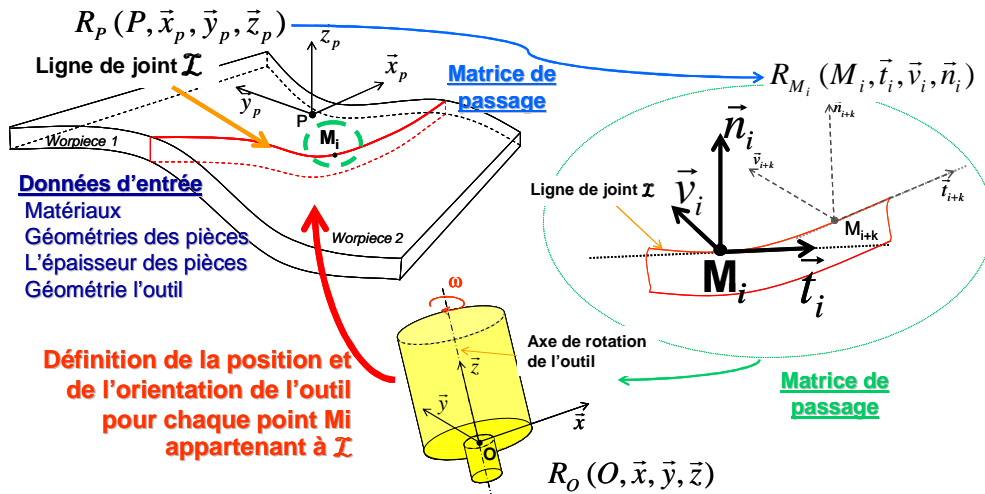


Fig. 4: Définition de la position et l'orientation de l'outil en chaque lieu de soudure.

L'espace de travail et l'ensemble des positions et orientation dans l'espace de travail constituent les premiers éléments des spécifications requises par le moyen de soudage. En chaque point  $M_i$ , des torseurs des actions mécaniques et cinématiques sont appliqués sur l'outil. De ces torseurs il est nécessaire d'identifier les paramètres caractéristiques pour le dimensionnement, dans un premier temps statique, du moyen de soudage. Ceci est réalisé à travers l'analyse globale, des efforts, des couples appliqués sur l'outil et de la cinématique de l'outil sur l'opération de soudage.

Avant de procéder à l'analyse du domaine de soudabilité, il a été nécessaire d'identifier les critères de performance d'un moyen de production.

### 3 Identification des critères de performances

Au cours du soudage FSW, le moyen de soudage doit être capable d'assurer la position et l'orientation de l'outil, appliquer la cinématique, les efforts et les couples sur l'outil. Ces critères se retrouvent dans les torseurs des actions mécaniques et cinématiques comme présentés sur la **Fig. 5**. Les paramètres encadrés sont les paramètres de conduite du procédé pendant la phase de soudage. La Fig. 6 présente les efforts latéral, axial et d'avance ainsi que le couple à la broche générés en FSW sur les différentes phases qui composent l'opération de soudage. Ces efforts et ces couples évoluent au cours du soudage, et dépendent des paramètres de conduite. Une analyse menée sur plusieurs matériaux et épaisseurs a montré que les efforts et les couples étaient prépondérants lors de la phase de plongée et de soudage à vitesse constante [6]. C'est pourquoi, ces deux phases ont été qualifiées de dimensionnantes pour un moyen de soudage FSW. Ces efforts et ces couples, mesurés sur ces deux phases, constituent les données d'entrée du cahier des charges techniques du moyen de soudage. Ils conditionnent les capacités des actionneurs, les efforts et couples générés doivent être inférieurs à ceux admissibles.

Dans un souci d'industrialisation du procédé, il est nécessaire d'analyser l'influence des paramètres opératoires sur l'interaction outil / matière, pour les deux phases identifiées comme dimensionnantes.

#### **Torseur cinématique appliqué au centre de l'outil**

$$\left\{ \mathcal{T}_{\text{pion/pièce}} \right\} = \left\{ \boxed{\vec{\omega}} + \vec{\Omega}_{\text{Suivi\_de\_joint}} \mid \boxed{\vec{V}_a} + \vec{V}_z \right\}_O$$

Vitesse de rotation de l'outil
Vitesse liée au contrôle en effort de l'opération de soudage

Vitesse de rotation liée au suivi de la trajectoire
Vitesse d'avance de l'outil. Vecteur colinéaire à  $\vec{t}$

#### **Torseur des actions mécaniques**

$$\left\{ \mathcal{T}_{\text{pion/pièce}} \right\} = \left\{ \boxed{\vec{F}_z} + \vec{R}_{\text{Outil / Pièce}} \mid \vec{C}_z + \vec{M}_{\text{Outil / Pièce}} \right\}_O$$

Effort axial,  $F_z$ 
Moments liés au suivi de trajectoire de l'outil

Effort d'avance et effort transverse
Couple lié à la rotation de l'outil

#### **Identification des paramètres de conduite du procédé en phase de soudage**

Fig. 5: Décomposition des torseurs des actions mécaniques et cinématiques appliqués au cours du soudage

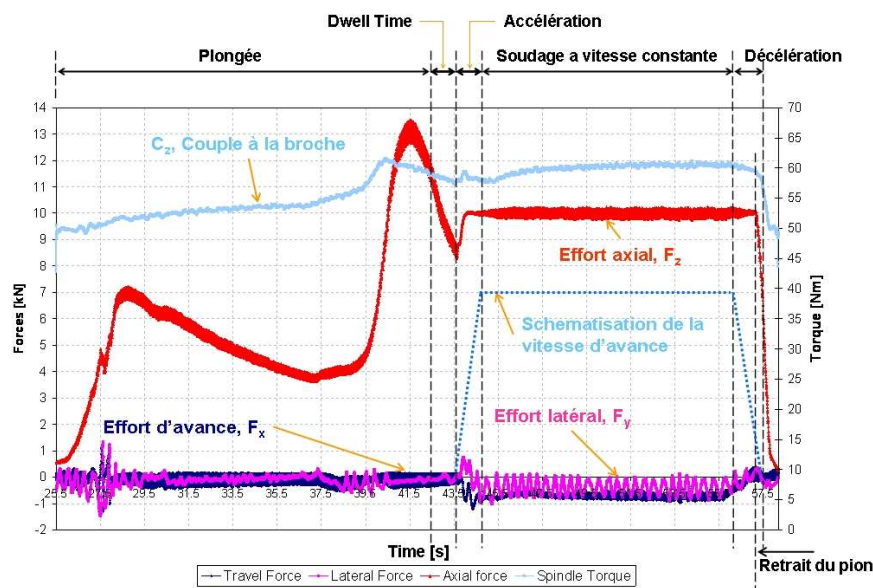


Fig. 6: Efforts et couples appliqués sur l'outil au cours d'une opération de soudage. Soudage d'un alliage d'aluminium d'épaisseur 6mm.

#### 4 Analyse du domaine de soudabilité opératoire (DSO)

La détermination du domaine de soudabilité opératoire (action A4 du diagramme IDEF0, Fig. 3) doit s'étendre aux deux phases caractéristiques pour le dimensionnement, à savoir, la phase de plongée et celle de soudage à vitesse constante. La Fig. 7 propose une formalisation de la démarche en se basant sur l'étude des domaines de soudabilité opératoires des phases de plongée et de soudage.

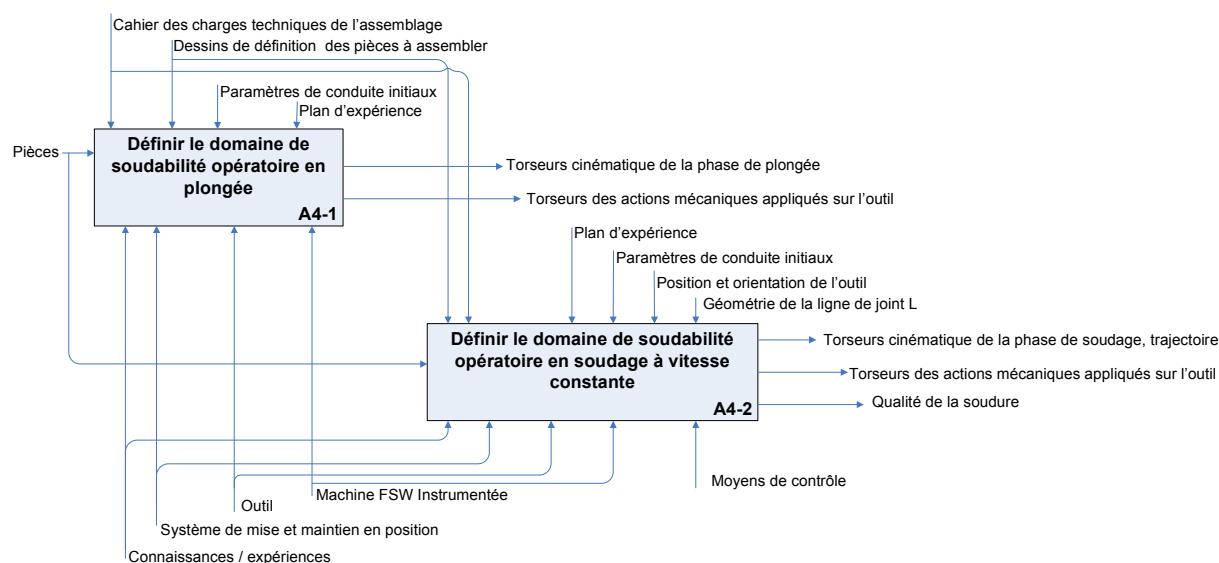


Fig. 7: Graphe IDEF0-A4: Définir le domaine de soudabilité opératoire

La réalisation d'un plan d'expérience sur chacune des phases permet de dresser les domaines de fonctionnement pour chacune des phases. A chaque combinaison de paramètres opératoires, pour chacune des phases, est associé un torseur des actions mécaniques et cinématique. La Fig. 8 présente un exemple de domaine de soudabilité opératoire, pour les phases de plongée et de soudage à vitesse constante d'un alliage d'aluminium. L'ensemble de ces données, torseurs des actions mécaniques et cinématique, sont utilisées pour simuler l'opération de soudage avec le moyen de production choisi afin de valider sa capacité à réaliser l'opération. L'objectif étant de trouver le ou les différents point(s) de fonctionnement possibles permettant de réaliser l'opération de soudage dans l'espace de travail du moyen de production tout en respectant les critères de tenue mécanique et de qualité exigés par le cahier des charges produit.



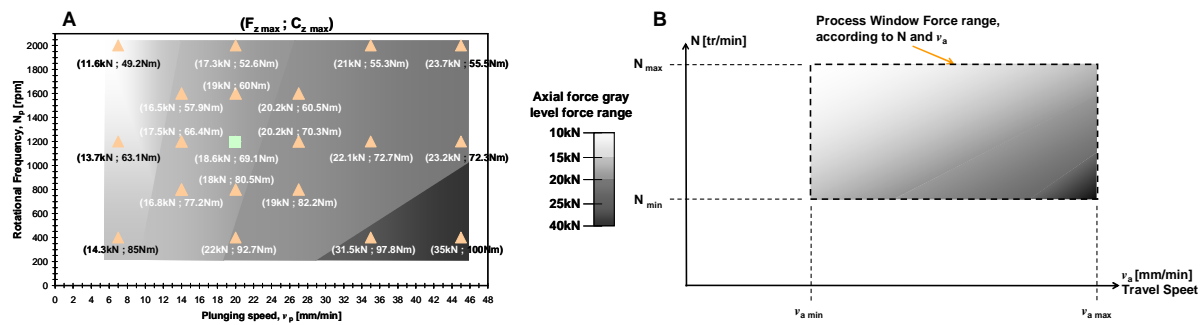


Fig. 8: Gammes d'effort axial  $F_z$  en fonction des paramètres opératoires. A- Pour la phase de plongée. B- Pour la phase de soudage à vitesse constante

L'analyse des résultats expérimentaux montre qu'un défaut de compacité de matière, au sein du cordon, peut survenir à la transition des phases de plongée et de soudage à vitesse constante. Ainsi, il est nécessaire de prendre en considération cette phase de transition, en adaptant les paramètres de conduite du dwell time et de la phase d'accélération afin d'éviter ce défaut, voir Fig. 6.

## 5 Conclusions et perspectives

L'article présente à travers la formalisation des graphes IDEF0 une méthodologie pour qualifier un moyen de soudage FSW. Elle est basée sur l'analyse géométrique des pièces et sur la détermination du domaine de soudabilité opératoire des phases de soudage et de plongée. Cette détermination est réalisée expérimentalement. Les efforts et les couples transmis au moyen de production sont mesurés au cours de l'expérimentation. Les actions mécaniques transmises et le résultat de l'analyse géométrique permettent d'écrire le cahier des charges technique du moyen de soudage. D'autre part, afin de qualifier un moyen de production existant, ces torseurs des actions mécaniques constituent le point d'entrée pour valider, dans un premier temps statiquement, la faisabilité de l'opération. Le logiciel de simulation permet alors de trouver la configuration, position dans l'espace de travail et paramètres opératoires assurant la faisabilité de l'opération de FSW tout en respectant le cahier des charges techniques de l'assemblage. Le travail à venir se concentrera sur l'application de cette méthodologie aux robots poly-articulés, machines standards et flexibles permettant le soudage de formes complexes. Ce type de machine très utilisée dans l'industrie semble offrir des potentiels d'industrialisation du FSW. Toutefois, ayant des capacités restreintes, il est nécessaire de définir les domaines d'application de cette machine à l'aide de la méthodologie mise en place. D'autre part, il est nécessaire d'identifier les facteurs générant le défaut de compacité à la transition des phases de plongée et de soudage à vitesse constante.

## Références

- [1] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templemith, C.J. Dawes Patent Application No. 9125978.8 (December 1991)
- [2] R.S Mishra, Z.Y. Ma, Friction Stir Welding and processing, Materials Sciences and Engineering, Vol 50, 2005, p. 1-78
- [3] C.B. SMITH, Robotic Friction Stir Welding using a Standard Industrial Robot, 2<sup>nd</sup> FSW Symposium, 2000
- [4] M. SORON, Towards Multidimensionality and Flexibility in Friction Stir Welding Using an Industrial Robot System, Recent Advances in Friction Welding and Allied Processes, Dubrovnik, Croatia, 2007
- [5] W.J. Arbogast, Application of Friction Stir Welding and related technologies, Friction Stir Welding and Processing - Chapter 13 p 273-307, ISBN-13:978-0-87170-840-3
- [6] S. Zimmer, L. Langlois, J. Laye, J.-C. Goussain, P. Martin, R. Bigot, Methodology for qualifying Friction Stir Welding equipment, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on FSW 2008